



Monitorização de estruturas com interferometria SAR

Dora ROQUE^{1,*}, Daniele PERISSIN², Ana Paula FALCÃO³, Maria João HENRIQUES¹ e Ana Maria FONSECA¹

¹ Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa

² Purdue University (Estados Unidos da América)

³ Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa

(droque@lnec.pt; daniele.perissin@sarproz.com; ana.p.falcao@tecnico.ulisboa.pt; mjoao@lnec.pt; anafonseca@lnec.pt)

Palavras-chave: Detecção remota, Interferometria SAR, Controlo de segurança

Resumo: A monitorização de estruturas é uma atividade de grande importância para garantir a segurança de pessoas e bens. A geodesia tem um papel determinante nesta tarefa ao possibilitar a medição de deslocamentos em zonas de interesse com elevada precisão.

A interferometria por radar de abertura sintética (InSAR) permite obter deslocamentos numa rede de observação que contempla não só a estrutura, mas também a sua envolvente, de cuja estabilidade também depende. Esta tecnologia permite complementar as redes de observação já existentes ao aumentar o número de pontos observados e ao possibilitar a realização de observações com maior frequência.

O objetivo desta comunicação é apresentar alguns exemplos de medição de deslocamentos em estruturas realizados com a tecnologia InSAR e validar esses resultados através da comparação com deslocamentos obtidos por métodos geodésicos. Serão consideradas estruturas localizadas em Lisboa - o pavilhão MEO Arena e alguns edifícios na Baixa da cidade - e no Alentejo - uma barragem de aterro e a envolvente da sua albufeira. Os resultados obtidos mostram uma concordância elevada entre as duas técnicas, indicando que o InSAR pode ser uma mais-valia para ser utilizado em sistemas de alerta atempado na prevenção de situações de emergência.



1. Introdução

A monitorização de estruturas é uma atividade de elevada importância para a sociedade. As funções desempenhadas pelas estruturas tornam-nas essenciais para as atividades humanas, sendo fundamental identificar possíveis instabilidades atempadamente e efetuar ações de conservação de modo a garantir a segurança de pessoas e bens. A medição de deslocamentos tem um papel fundamental para essa monitorização, ao permitir avaliar se o comportamento da estrutura cumpre os critérios de segurança ou se apresenta sinais que possam indiciar uma possível situação de perigo. Os deslocamentos podem ser determinados com métodos *in situ*, tais como observações geodésicas ou equipamentos instalados nas estruturas. Estes métodos permitem obter deslocamentos com elevada precisão, no entanto apenas possibilitam a realização de observações da estrutura. Em muitos casos, para além do controlo do comportamento desta, também a envolvente deve ser monitorizada quando a sua estabilidade influencia o comportamento da estrutura. Em algumas situações, por exemplo as encostas das albufeiras de barragens podem representar um risco para a população, dada a possibilidade de ocorrência de deslizamentos de terra, em particular durante o primeiro enchimento da albufeira.

As técnicas multitemporais de interferometria SAR (MTInSAR) surgiram no início do século XXI (Berardino *et al.*, 2002; Ferretti *et al.*, 2000; Ferretti *et al.*, 2001) e baseiam-se na análise de um conjunto de imagens SAR, adquiridas na banda das micro-ondas do espectro eletromagnético, em que são observadas diferenças de fase entre as épocas de aquisição. As diferenças de fase são avaliadas para pontos que mantiveram um comportamento refletor estável nas imagens consideradas – os dispersores persistentes. O facto de serem utilizados grandes conjuntos de imagens possibilita a separação de várias componentes da diferença de fase, nomeadamente, deslocamento na superfície terrestre, topografia e efeito atmosférico, permitindo a determinação dos deslocamentos com precisão milimétrica para os dispersores persistentes. A interferometria SAR tem sido utilizada no estudo de fenómenos geológicos como monitorização de vulcões, falhas sísmicas, subsidência em zonas urbanas ou deslizamentos de terra (Heleno *et al.*, 2011; Hooper *et al.*, 2004). Recentemente, a investigação e o desenvolvimento têm sido direcionados para a monitorização de estruturas (Fornaro *et al.*, 2013; Perissin e Wang, 2011a).

O objetivo deste trabalho é apresentar alguns exemplos de monitorização de estruturas e da sua envolvente através de interferometria SAR. São considerados diferentes géneros de estruturas, nomeadamente, edifícios e barragens. Em particular, são apresentados resultados para edifícios da Baixa da cidade de Lisboa, para o pavilhão MEO Arena e uma barragem de aterro no Alentejo. Os resultados obtidos foram comparados com observações geodésicas efetuadas pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil ou pelo dono de obra, tendo sido observada uma concordância elevada.

A próxima secção do texto apresenta as zonas de estudo consideradas nesta análise. A secção 3 indica os procedimentos executados para cada caso de estudo, enquanto a secção 4 apresenta os resultados obtidos e a sua discussão. A secção final contém as conclusões do trabalho.

2. Zonas de estudo e dados

Neste trabalho foram consideradas duas zonas de estudo distintas, em que uma se situa em meio urbano e outra num meio rural (Figura 1). A zona urbana divide-se em duas regiões de interesse: a Baixa da cidade de Lisboa e o pavilhão MEO Arena no Parque das Nações.

A Baixa é uma zona da cidade de elevada importância governamental, comercial, histórica e cultural. O solo sobre o qual esta zona da cidade foi construída é composto por sedimentos transportados por antigas ribeiras e também, em certas zonas, por escombros de edifícios destruídos no terramoto de 1755, o que torna esta área vulnerável, por exemplo em caso de ocorrência de um sismo. O facto de nesta zona haver o cruzamento de duas linhas de metro e também em resultado da recente expansão de uma dessas linhas houve um aumento da instabilidade da zona. Desde os anos 50 do século XX que o Laboratório Nacional de Engenharia Civil monitoriza a ala Oeste do edifício da Praça do Comércio através de nivelamento geométrico, verificando-se um comportamento de subsidência que se acentua de Norte para Sul (Henriques *et al.*, 2009).

O pavilhão MEO Arena é uma das maiores salas de espetáculos do país e é monitorizado pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil desde 2002. Os deslocamentos de pontos da estrutura em madeira que suporta a cobertura são obtidos



por observações geodésicas. No interior do pavilhão, existem dois pontos de referência localizados nas torres técnicas do edifício, a partir dos quais são efetuadas observações taqueométricas para um conjunto de alvos implantados nas vigas de madeira que suportam a cobertura de zinco da estrutura. O pavilhão é observado duas vezes por ano, a fim de permitir analisar o seu comportamento sazonal devido ao efeito da humidade do ar sobre as vigas de madeira, que faz com que a estrutura empole no inverno e contraia no verão.

O estudo da aplicabilidade do método a barragens de aterro e margens da albufeira foi aplicado a uma barragem pertencente à EDIA – Empresa para o Desenvolvimento e Infra-estruturas do Alqueva, S.A.. Foi selecionada a barragem de aterro Álamos I e as margens da albufeira das barragens Álamos I, II e III. A construção destas barragens concluiu-se em 2006. Estas permitiram criar uma zona para armazenamento de água, proveniente da albufeira de Alqueva através de uma estação elevatória, que depois é transferida por canal para a barragem do Loureiro e desta para outras zonas alentejanas.



Figura 1 – Zonas de estudo em Lisboa e no Alentejo (© Google earth)

As imagens SAR utilizadas para o estudo foram adquiridas pelo sensor Envisat ASAR, foram fornecidas gratuitamente pela Agência Espacial Europeia (*European Space Agency - ESA*) e as suas características podem ser consultadas no Quadro 1. Como Modelo Digital de Superfície foi utilizado o *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)* fornecido gratuitamente pela NASA.

O processamento foi realizado no programa SARPROZ[®] desenvolvido pelo Professor Daniele Perissin.

Quadro 1 – Identificação do número de imagens SAR, das órbitas relativas e dos anos de aquisição da primeira e última imagem para cada zona de estudo

Zona de estudo	Número de imagens	Órbita relativa	Início	Fim
Lisboa	15	87A	2008	2009
Lisboa	17	223D	2003	2009
Álamos I	6	238D	2011	2012
Margens	16	409D	2004	2010



3. Métodos

3.1 Processamento geral

Para cada uma das zonas de estudo foi selecionada a área de interesse, centrada na estrutura ou na envolvente que se pretendia monitorizar. Em cada caso, as imagens foram co-registadas com base em informação orbital e foram georreferenciadas manualmente. Para a Baixa de Lisboa e para as margens da albufeira das barragens Álamos foi estimado o atraso do sinal causado pela atmosfera para cada imagem. Para a barragem e para o pavilhão MEO Arena, como apenas foi considerada uma pequena área na vizinhança das estruturas, o efeito atmosférico pôde ser negligenciado, uma vez que é igual para o ponto de referência e para qualquer dispersor da zona de estudo. Este efeito foi estimado para um conjunto de candidatos a dispersores persistentes, interpolado para toda a zona de estudo e retirado às imagens. Os valores da velocidade e da altitude residual para cada dispersor persistente foram obtidos através da maximização da coerência temporal γ (Equação 1), onde N é o número de interferogramas, φ_i é a fase observada e $\hat{\varphi}_i$ é a fase estimada, que depende da velocidade e da altitude residual.

$$\gamma = \frac{1}{N} \left| \sum_{i=1}^N e^{j(\varphi_i - \hat{\varphi}_i)} \right| \quad (1)$$

Com o objetivo de eliminar ruído associado aos resultados, as séries temporais de deslocamentos foram filtradas com uma média móvel. A fim de permitir a comparação entre os resultados obtidos pelos métodos geodésicos e as técnicas MTInSAR, os deslocamentos em planimetria e altimetria provenientes das observações geodésicas foram projetados na linha de vista do sensor SAR.

3.2 Lisboa

O algoritmo apresentado foi aplicado a um conjunto de 15 imagens para a zona da Baixa, quase todas adquiridas regularmente a cada 35 dias. No parâmetro da fase estimada da Equação 1 foram considerados três termos: a altitude residual, a velocidade linear e uma terceira componente que relaciona a fase com a temperatura. A terceira componente deve ser considerada quando a zona a monitorizar apresenta um comportamento sazonal. Foi considerado um ponto de referência numa das colinas próximas da Baixa.

O pavilhão MEO Arena possui uma estrutura em madeira GLULAM que suporta a cobertura. O seu comportamento tem sido ditado pela conjugação do efeito da idade com o efeito das condições atmosféricas na madeira. Em estruturas de madeira é habitual ocorrerem grandes deslocamentos nos primeiros anos após a sua construção. O efeito da idade reduz-se com o tempo e, frequentemente, torna-se nulo após alguns anos. Já o efeito das condições atmosféricas (em especial a humidade), com caráter sazonal, é permanente. Os resultados das observações geodésicas realizadas no Pavilhão desde 2002 mostram que nos primeiros anos a componente da idade prevaleceu mas, a partir de 2008, esta componente ficou quase nula.

Para o pavilhão MEO Arena foram realizados dois estudos. O primeiro tinha como objetivo avaliar a capacidade das técnicas MTInSAR para detetar o assentamento da estrutura do pavilhão que ocorreu nos primeiros anos após a sua construção em resultado do efeito da idade. Para este estudo foi selecionado o conjunto de imagens SAR adquiridas entre 2003 e 2009. O segundo estudo pretendia identificar o comportamento sazonal da estrutura. Neste caso, foi utilizado o conjunto de imagens adquiridas entre 2008 e 2009, porque as imagens foram adquiridas com uma frequência mais regular que a do conjunto de imagens anterior. Em ambos os estudos foram estimadas a altitude residual, a velocidade linear e a componente sazonal dos deslocamentos. O ponto de referência utilizado localiza-se na plataforma onde o pavilhão está assente e supõe-se que não haja deslocamentos relativos entre esta plataforma e as torres técnicas do edifício onde estão os pontos de referência da rede de observação geodésica. Desta forma, torna-se possível comparar os resultados obtidos pelas duas técnicas.

3.3 Barragens

Para a análise de deslocamentos na barragem Álamos I através de técnicas MTInSAR foi selecionado um conjunto de imagens SAR em que todas foram adquiridas após a construção da barragem, em 2006. Desta forma, foi utilizado o conjunto composto por apenas seis imagens adquiridas entre 2011 e 2012. Uma vez que o processamento foi efetuado apenas para uma pequena vizinhança da barragem, o efeito atmosférico pôde ser negligenciado, caso contrário, este conjunto não poderia ter sido utilizado por não ter um número de imagens suficiente para estimar este efeito. Na primeira

parte do processamento, foram considerados todos os interferogramas possíveis construídos com as imagens disponíveis. A técnica dos dispersores quase-persistentes (Perissin e Wang, 2011b), que para cada dispersor considera apenas os interferogramas que apresentam coerência elevada nesse ponto, foi utilizada para definir um modelo para a altitude residual. Esse modelo foi depois utilizado, juntamente com um modelo de deslocamento não linear, para obter dispersores persistentes na barragem. Um procedimento semelhante foi seguido para avaliar o comportamento da envolvente da albufeira. Contudo, neste caso, foi utilizado o conjunto de 16 imagens adquiridas entre 2004 e 2010, para permitir estimar o efeito atmosférico, dado que a zona de estudo tinha uma dimensão considerável. Além disso, também interessava verificar o comportamento das margens em fases diferentes da vida da estrutura (antes da construção, primeiro enchimento e exploração).

4. Resultados e discussão

4.1 Baixa de Lisboa

O processamento realizado para a Baixa de Lisboa permitiu a deteção de um elevado número de dispersores persistentes (densidade de 412 dispersores/km²). Verificou-se que alguns destes dispersores apresentavam valores de velocidade linear negativa, ou seja, os pontos estavam a afastar-se do sensor, o que pode indicar que estava a ocorrer subsidência. Os dispersores onde este efeito era mais notável estavam localizados junto ao rio Tejo e situavam-se em zonas de aterros (Figura 2). É possível que tenha ocorrido compactação destes materiais ao longo do intervalo de tempo considerado no estudo (entre março de 2008 e novembro de 2009), o que explicaria o comportamento observado através das técnicas MTInSAR. O dispersor observado com maior valor absoluto de velocidade encontrava-se próximo da atual estação do metro Terreiro do Paço. Este dispersor apresentava uma velocidade linear de -9,2 mm/ano (Figura 3). São, também, visíveis alguns dispersores em edifícios que apresentavam valores negativos de velocidade e que se destacavam dos vizinhos, o que pode indicar instabilidade. A equipa está a aguardar informações da Câmara Municipal de Lisboa sobre os edifícios referidos.

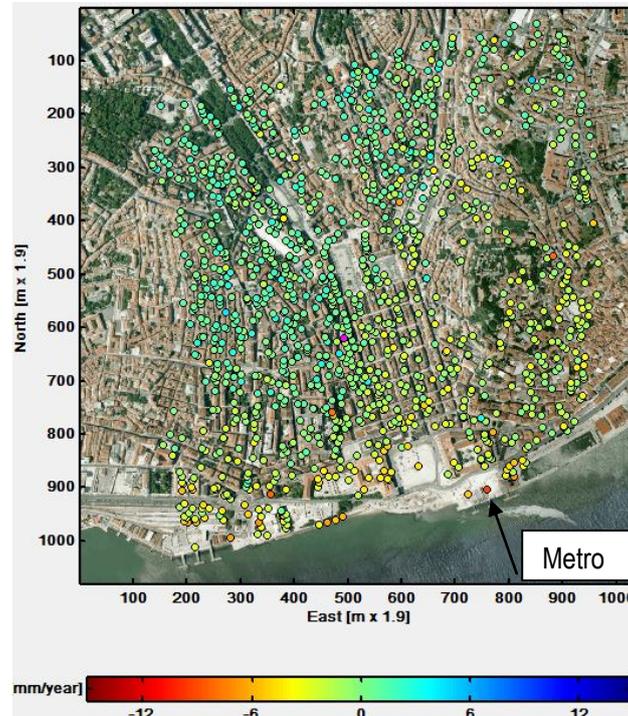


Figura 2 – Mapa de velocidade linear para a Baixa de Lisboa

A maior parte dos dispersores persistentes identificados na Baixa apresentavam um quociente entre a fase e a temperatura com valores negativos, ou seja, os dispersores aproximavam-se do sensor no inverno e afastavam-se no verão. Este comportamento é consistente com a presença de água no subsolo, havendo duas possíveis causas que se

pretende avaliar em trabalho futuro. Uma das possibilidades é este comportamento ser causado pela recarga dos aquíferos durante o inverno devido à precipitação e a outra é a infiltração da água do rio no subsolo quando a maré sobe, sendo possível que se verifique um efeito combinado dos dois fenómenos.

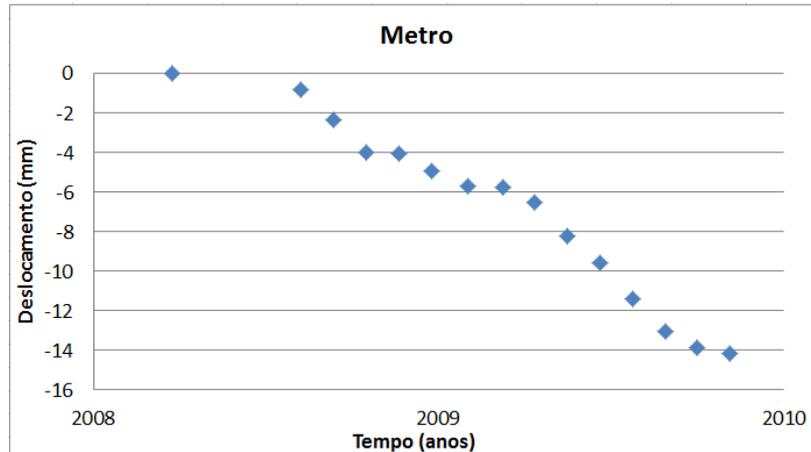


Figura 3 – Série temporal de deslocamentos para um dispersor persistente localizado perto da estação de metro Terreiro do Paço

Não foi possível validar os resultados obtidos com as técnicas MTInSAR, uma vez que não foram obtidos dispersores coincidentes com as marcas de nivelamento do sistema de monitorização existente na Praça do Comércio.

4.2 Pavilhão MEO Arena

Para o estudo do assentamento do pavilhão MEO Arena foram identificados alguns dispersores persistentes, dois dos quais próximos da vertical de dois pontos observados nas campanhas geodésicas. Apesar das lacunas existentes na série temporal das imagens SAR, os dois conjuntos de dados apresentam tendências bastante semelhantes, nomeadamente, o assentamento do edifício, que foi mais rápido nos primeiros anos e que tem vindo a estabilizar. Observou-se também um efeito sazonal, entre 2003 e 2005, que não foi identificado nos anos seguintes devido à inexistência de imagens adquiridas com uma frequência regular.

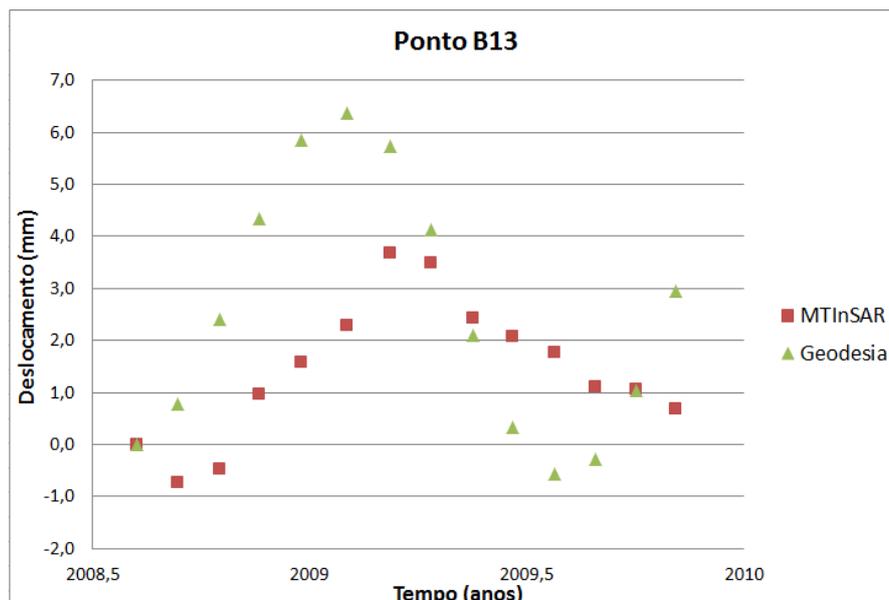


Figura 4 – Comparação entre as séries temporais dos deslocamentos obtidas com MTInSAR e com as observações geodésicas



O segundo estudo efetuado para o pavilhão MEO Arena tinha como objetivo a identificação do comportamento sazonal da estrutura. Neste processamento foi identificado apenas um dispersor persistente próximo da vertical de um ponto monitorizado no interior do edifício. Verificou-se que as técnicas MTInSAR identificaram um comportamento oscilatório semelhante ao observado nas campanhas geodésicas, em que o ponto se aproxima do sensor durante o inverno e afasta-se durante o verão (Figura 4). Contudo, observou-se que os mínimos e máximos da oscilação não foram atingidos nos mesmos meses para as duas técnicas e que a amplitude da oscilação obtida com técnicas MTInSAR era menor do que a dos métodos geodésicos. Estas discrepâncias podem ser devidas à diferente localização dos pontos cujo comportamento está a ser comparado, uma vez que o ponto observado com técnicas MTInSAR (localizado na cobertura) está sujeito a outros fenómenos para além do deslocamento das vigas de madeira. O efeito da temperatura sobre a cobertura de zinco poderá explicar a diferença de amplitudes observada, dado que o aumento da temperatura no verão provoca a subida da cobertura na mesma altura em que a contração das vigas de madeira (pela diminuição da humidade do ar) provoca a descida desta.

4.3 Barragem e envolvente

Para a barragem de aterro Álamos I foram identificados alguns dispersores na estrutura. Foram selecionados um situado no coroamento e dois na banquetta, na proximidade de pontos que têm sido monitorizados por métodos geodésicos pelo dono de obra. Os dados obtidos com as técnicas MTInSAR foram comparados com dados de nivelamento projetados na linha de vista do sensor, não tendo sido considerados os dados planimétricos porque estes não estavam disponíveis para os pontos da linha de nivelamento. Para o dispersor no coroamento da barragem, foi observada uma tendência muito próxima da verificada nas campanhas geodésicas, com o dispersor a afastar-se do sensor, o que pode corresponder a um assentamento, tendo sido obtida uma diferença das velocidades médias entre as duas técnicas de 0,2 mm/ano. Para os dois dispersores localizados na banquetta, as diferenças observadas entre os dois métodos foram superiores (1,4 mm/ano e 1,7 mm/ano). Esta discrepância pode ser devida ao facto de os pontos na banquetta terem deslocamentos significativos em planimetria quando comparados com os altimétricos (pelas observações geodésicas) e a validação estar a ser efetuada só com a altimetria. Relativamente ao ponto localizado no coroamento, os dados obtidos por métodos geodésicos mostram que o deslocamento é essencialmente vertical, o que pode explicar a concordância elevada entre as duas técnicas mesmo quando a comparação é feita apenas com a altimetria.

Quanto ao processamento para as margens da albufeira das barragens Álamos, foram identificados alguns dispersores na zona de interesse e verificou-se a existência de um padrão de comportamento para os dispersores mais próximos da albufeira: todos eles se estavam a aproximar do sensor. A Figura 5 apresenta a série temporal de deslocamentos de um destes dispersores, em que se verificou que houve uma alteração do comportamento deste após o primeiro enchimento da albufeira (em 2006), quando este deixou de se afastar do sensor e começou a aproximar-se dele. Através da série temporal, verificou-se, ainda, que a velocidade com que o dispersor se aproximava do sensor diminuiu. Estes resultados não foram validados por não haver observações geodésicas disponíveis.

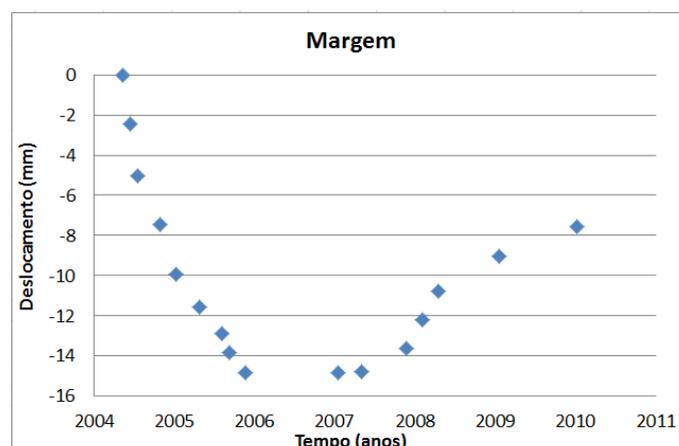


Figura 5 – Série temporal de deslocamentos de um dispersor próximo da albufeira



5. Conclusão

As técnicas multitemporais de interferometria SAR aplicadas às zonas de estudo consideradas neste trabalho permitiram a identificação de vários dispersores persistentes nas estruturas que se pretendia avaliar e também na sua envolvente. Sempre que existiam dados de observações geodésicas disponíveis foi feita a comparação entre os resultados obtidos pelos dois métodos, tendo sido obtida uma concordância aceitável. Os métodos apresentados neste estudo podem ser úteis para construir sistemas de alerta atempado para identificar instabilidades em estruturas e nas suas envolventes (que não são frequentemente monitorizadas por métodos *in situ*). Esta técnica pode, também, ser uma mais-valia para o planeamento de campanhas geodésicas, ao possibilitar ter uma ideia prévia da extensão espacial do problema e do seu comportamento ao longo do tempo. A principal limitação da técnica para a monitorização de estruturas observada neste estudo foi a existência de lacunas nas séries temporais de imagens SAR, que diminuem a robustez dos resultados, principalmente quando se pretende monitorizar movimentos sazonais. Estas lacunas são bastante frequentes nos conjuntos de imagens Envisat ASAR. Pretende-se, para trabalho futuro, aplicar estes métodos a imagens adquiridas por outros sensores, com uma frequência de aquisição mais regular e maior resolução espacial, como é o caso das imagens adquiridas pelo sensor a bordo do satélite Sentinel-1A. Para melhorar os resultados obtidos, no futuro, também se pretende realizar sinalização prévia, passiva e ativa, de pontos de interesse.

Agradecimentos

Os autores agradecem à EDIA – Empresa para o Desenvolvimento e Infra-estruturas do Alqueva, S.A. e ao MEO Arena pela disponibilização dos dados das observações geodésicas. Imagens SAR fornecidas pela Agência Espacial Europeia.

Referências Bibliográficas

- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R. e Sansosti, E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 40, No. 11, pp. 2375-2382.
- Ferretti, A., Prati, C. e Rocca, F. (2000). Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 38, No. 5, pp. 2202-2212.
- Ferretti, A., Prati, C. e Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 39, No. 1, pp. 8-20.
- Fornaro, G., Reale, D. e Verde, S. (2013). Bridge thermal dilation monitoring with millimeter sensitivity via multidimensional SAR imaging, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Vol. 10, No. 4, pp. 677 – 681.
- Heleno, S.I.N., Oliveira, L.G.S., Henriques, M.J., Falcão, A.P., Lima, J.N., Cooksley, G., Ferretti, A., Fonseca, A.M., Lobo-Ferreira, J.P. e Fonseca, J.F.B.D. (2011). Persistent scatterers interferometry detects and measures ground subsidence in Lisbon. *Remote Sensing of Environment*, 115, pp. 2152-2167.
- Henriques, M.J., Coelho, J., Vieira, J., Candeias, H. e Catrau, F. (2009). O Sistema para Controlo de Deslocamentos Verticais da Ala Ocidental do Terreiro do Paço. *Atas do II Encontro Nacional de Geodesia Aplicada*, LNEC.
- Hooper, A., Zebker, H., Segall, P. e Kampes, B. (2004). A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical Research Letters*, Vol. 31, L23611, pp. 1-5.
- Perissin, D. e Wang, T. (2011a). Time-series InSAR applications over urban areas in China. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, Vol. 4, No. 1, pp. 92-99.
- Perissin, D. e Wang, T. (2011b). Repeat-pass SAR interferometry with partially coherent targets. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 50, No. 1, pp. 271-280.